УДК 677.027:625.15:621.763

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОМФОРТНОСТИ ТРУДА ВОДИТЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРИКОТАЖА В ОБИВОЧНОМ И ПОДДЕРЖИВАЮЩЕМ СЛОЯХ АВТОСИДЕНЬЯ

PREDICTION OF COMFORTABLE DRIVER CONDITIONS USING KNITTED FABRICS IN UPHOLSTERY AND SUPPORTING LAYERS FOR CAR SEATS

А.П. БАШКОВ, Г.В. БАШКОВА, О.С. РУМЯНЦЕВА, Н.А. ОНИПЧЕНКО
A.P. BASHKOV, G.V. BASHKOVA, O.S. RUMYANTSEVA, N.A. ONIPCHENKO

(Ивановский государственный политехнический университет)
(Ivanovo State Polytechnical University)
E-mail: apb303@yandex.ru, milena55@yandex.ru

Для проектирования многослойной структуры поддерживающего и обивочного слоев автосиденья из льносодержащего трикотажа, обеспечивающей максимальный тепловой комфорт, необходимо рассчитать распределение температуры в пространстве между контактирующими поверхностями тела человека и сиденья, с учетом тепловыделений человека и внешнего температурного поля. Расчет распределения температуры осуществляется методом конечных элементов. При этом эффективный коэффициент теплопередачи пористой структуры определяется аналитически на основе метода макроквантования в зависимости от вида исходного волокна, от числа и размера пор в элементе трикотажной структуры.

It is necessary to calculate the temperature distribution in the space between the contacting surfaces of the human body and the seat given the human heat and external temperature field for the designing of the flax knitted fabrics multilayer structure of car seats which consists of upholstery and supporting layers ensuring maximum thermal comfort.

The calculation of the temperature distribution is carried out by finite element method. The effective heat transfer coefficient of the porous structure was analytically determined on the basis of macro quantization method according to the starting kind of fiber (flax), the number and size of pores in the element structure knitting.

Ключевые слова: многослойная текстильная структура, автомобильное сиденье, эффективный коэффициент теплопроводности, распределение температуры.

Keywords: multilayer textile structure, car seat, the effective thermal conductivity, temperature distribution.

Ощущение комфортности при долгом пребывании в автомобильном сиденье определяется гигиеническими свойствами его обивочного и поддерживающего слоев и оценивается распределением температуры в пространстве между телом человека и сиденьем. Для проектирования многослойной структуры сиденья, обеспечивающей максимальный тепловой комфорт, необходимо рассчитать распределение температуры в узком пространстве между контактирующими поверхностями тела человека и сиденья с учетом ее теплопроводности, тепловыделений человека и внешнего температурного поля. В качестве обивочного и поддерживающего слоев сидений предлагается использовать основовязаный трикотаж тамбурного способа петлеобразования с разнонаправленным расположением нитей (петель), полученных из короткого льняного волокна с вложением отходов.

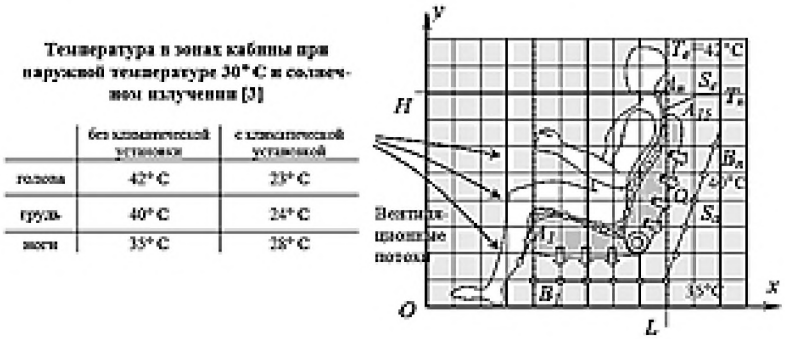

Рис. 1

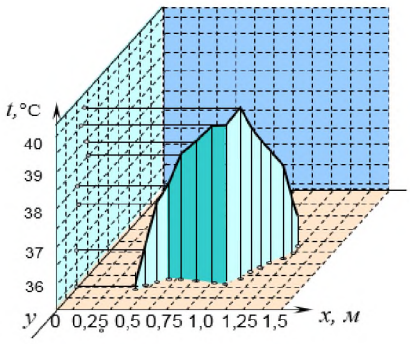

Рис. 2

Рассчитываемую область распределения температуры в виде сложной поверхности контакта тела человека и кресла можно рассматривать в одной или нескольких вертикальных секущих плоскостях и решать поставленную задачу в плоской системе координат xOy (рис. 1 – схема для расчета распределения температуры в пространстве между телом человека и автомобильным сиденьем). Известно уравнение Лапласа для определения теплопроводности [1]:

$$\Delta^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial y} = 0, \qquad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; T – температура; x и y – координаты.

Задача определяется для множества элементов ℓ, состоящих из областей с границами S [2], при этом граничными условиями Дирихле на части границы будут (рис. 2 – распределение температур в зоне между поверхностью кресла и телом человека):

$$T = 34°C, \ y = 0,$$
$$T = 40°C, \ y = H$$

и условиями Неймана на остальной части границы:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \ x = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \ x = L. \qquad (2)$$

Здесь 34°С – рекомендуемая комфортная температура в пределах поверхности контакта [3], 40°С – наиболее вероятная температура лучистого теплового потока внутри кабины при наружной температуре 30° С в условиях инсоляции [4].

Задача решается с помощью эквивалентной вариационной формулировки, в соответствии с которой решение T(x, y) совпадает с некоторой функцией I(x, y), минимизируемой функционалом [2]:

$$I = \frac{1}{2}\iint_S \left[\left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{T}}{\partial y}\right)^2\right] dxdy, \qquad (3)$$

где $\hat{T}(x, y)$ – функция из допустимого множества пробных функций, заданных на поверхности контакта S_e. Допустимыми считаются непрерывные функции, имеющие кусочно-непрерывные первые производные и удовлетворяющие приведенным выше граничным условиям. Эти функции будут состоять из сочетания следующих зависимостей.

Интенсивность теплового потока и разница температур поверхностей или сред определяется выражением:

$$q = \frac{\lambda_{эф}}{\delta}(T_1 - T_2), \qquad (4)$$

где δ – толщина слоя.

Эффективный коэффициент $\lambda_{эфi}$ пористого слоя можно определить расчетно по методу макроквантования [5]:

$$\lambda_{эф} = \frac{2kTr^2}{\hbar}\left(\rho c_p K_r + \frac{2kT}{F_{эф} r K_V K_T \Delta T}\right), \qquad (5)$$

где T – термодинамическая температура, K; k – постоянная Больцмана $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/K, представляющая макроквант энтропии; $kT=\Delta Q$ – макроквант (приращение) тепловой энергии; $\hbar$ – постоянная Планка $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; r – характерный размер (радиус) макроячейки материала, м; ρ – плотность материала, г/м^3; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·K); K_r – коэффициент релаксации, выражающий степень динамического воздействия макроячейки на теплопередачу, $K_r = \frac{w_r}{3c_p}$; w_r – скорость распространения теплоты в веществе, м/с; $w_r = \sqrt{a\tau_r}$; a – коэффициент температуропроводности, м^2/с; τ_r – продолжительность релаксации, с; $F_{эф}$ – внутренняя эффективная (смачиваемая) поверхность материала, м^2; K_V – формфакторный коэффициент, корректирующий объем макроячейки; K_T – температурный корректирующий коэффициент $K_T=T_{экс}/T_0$, где $T_{экс}$ – температура материала в условиях эксперимента, °K; $T_0 = 273$°K – эталонная температура.

При переносе теплоты через многослойный пористый материал вводится эквивалентный коэффициент для всего пакета $\lambda_{экв}$, который будет зависеть от толщины материала [6]:

$$\lambda_{экв} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \delta_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_{эфi}}}. \qquad (6)$$

Температура в точке с координатой x при наличии источника тепла (человека) $q_{вн}$ определяется решением уравнения:

$$\Delta^2 T + \frac{q_{вн}}{\lambda} = 0. \qquad (7)$$

В проекции на ось Ox это будет [7]:

$$T_x = -\frac{q_{вн} x^2}{2\lambda_{экв}} + C_1 x + C_2, \qquad (8)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, зависящие от условий охлаждения (воздухопроницаемость слоев, наличие движения воздуха), определяются опытным путем.

Температурное поле задается в виде матрицы, которая указывает температуру в узловых точках (рис. 1). Также в матричной форме задаются управляющие функции.

Вся область контакта разбивается на ℓ конечных элементов [3]. Разбиение области и условия непрерывности позволяют записать функционал (3) в виде:

$$I = \sum_{i=1}^{\ell} I^{e_i}, \qquad (9)$$

где I^{e_i} – функционал (3) i-го конечного элемента с числом узлов e.

Температура внутри зоны контакта при стационарном процессе нагрева определяется по соотношению:

$$\frac{\partial I^e}{\partial T_{вн}^{\ e}} = k^e T_{вн}^{\ e} = 0, \qquad (10)$$

где T^e – значение температуры в узлах сетки (рис. 1); k^e – матрица теплопроводности элемента e, составленная из коэффициентов теплопроводности [3].

В соответствии с правилами метода конечных элементов для рассматриваемой зоны контакта может быть составлена глобальная матрица из i строк и j столбцов согласно выражениям (3), (4) и (5):

$$\begin{vmatrix} \dfrac{\partial I^1}{\partial T^{1-1}} \\ \dots \\ \dfrac{\partial I^\ell}{\partial T^{i-j}} \end{vmatrix} = \frac{1}{\ell\Delta} \begin{vmatrix} k_1^1 & \dots & k_i^\ell \\ \dots & \dots & \dots \\ k_j^1 & \dots & k_j^\ell \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_{вн}{}^1 \\ \dots \\ T_{вн}{}^\ell \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Для расчета теплопроводности и построения полей распределения температур в зоне контакта используется матричная математическая система MatLab. При программировании расчетов проводили поочередное вычисление строк матричного уравнения (9), соответствующих каждому узлу, согласно выражениям (5), (6), (8).

Для примера рассматривали зону контакта в проекции на координатную плоскость xOy с числом узлов 15×15. Температуры T_1 и T_{15} в точках со свободным теплообменом между телом человека и воздухом равны температуре кожи [3]. Перенос тепла воздушными потоками сквозь слой материала не учитывался. Расчетные коэффициенты теплопроводности для льняного трикотажного полотна – 0,046; для поддерживающего слоя из пространственного трикотажа – 0,042; для вспененного полиуретана – 0,027 Вт/(м·°С). Пусть температурное поле однородно; T=40°C и управляющие функции постоянны; $q_{вн}$ – 2,52МДж/м^2; q – 350 МДж/м^2; ρ_c – удельная теплоемкость материала: льняной слой – 2,3 кДж/кг·К; пенополиуретановый – 1,47 кДж/кг·К; $F_{эф}$ – 75 м^2 на 1 м^2 поверхности контакта S.

Матричное уравнение системы через 20 мин накопления теплоты и его решение можно записать в следующем виде:

$$\begin{vmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-4 & 0 & 0 & 10 & -2 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -8 & 0 & -2 & 20 & -2 & 0 & -8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -4 & 0 & -2 & 10 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 10 & -2 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -8 & 0 & -2 & 20 & -2 & 0 & -8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & -2 & 10 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 10 & -2 & 0 & -4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8 & 0 & -2 & 20 & -2 & 0 & -8 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & -2 & 10 & 0 & 0 & -4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{vmatrix}
\cdot
\begin{vmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{14} \\ T_{15} \end{vmatrix}
=
\begin{vmatrix} 34,4 \\ 36,4 \\ 37,5 \\ 38,0 \\ 39,0 \\ 39,5 \\ 40,0 \\ 41,0 \\ 41,5 \\ 40,5 \\ 39,5 \\ 39,0 \\ 37,5 \\ 36,0 \\ 35,6 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Кривая изменения температуры в пространстве контакта между поверхностями тела человека и сиденья показана на рис. 2. Температура меняется в зависимости от удаления до края поверхности сиденья, поскольку здесь заметное влияние оказывает коэффициент теплопередачи в направлении оси Oy через воздушный зазор между человеком и сиденьем.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета теплопроводности многослойной текстильной структуры с учетом геометрических характеристик слоя, теплоизоляционных свойств каждого слоя, внешнего температурного поля, внутреннего источника тепла.

2. Данная методика может применяться для проектирования текстильных многослойных материалов, используемых для автомобильных сидений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986.

2. *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов / Пер. с англ. В.И. Агошкова, под ред. Г.И. Марчука. – М.: Мир, 1977.

3. *Zhang H.* Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments // PhD thesis, University of California, Berkley (USA). – 2003.

4. Климатическая установка на автомобиле [электронный ресурс]. http://autoholding.net/ 270_klimaticheskaya_ustanovka_na_avtomobile.html.

5. *Светлов Д.О., Исаев В.В., Светлов Ю.В.* Эффективная теплопроводность материалов капиллярно-пористой и волокнистой структуры на основе макроквантового термодинамического метода // Сб.: Технологии XXI века в легкой промышленности. – М.: МГУТУ им. К.Г. Разумовского, 2012.

6. *Broiko A.P., Kharlamova O.N., Baranov A.Yu.* Analysis of knitted structures and study of heat transfer processes in knitted structures //Изв. вузов. Технология текстильной промышленностисти. – 2000, № 4. С. 82…84.

7. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977.

REFERENCES

1. Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov. – M.: Nauka, 1986.

2. Streng G., Fiks Dzh. Teorija metoda konechnyh jelementov / Per. s angl. V.I. Agoshkova, pod red. G.I. Marchuka. – M.: Mir, 1977.

3. Zhang H. Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments // PhD thesis, University of California, Berkley (USA). – 2003.

4. Klimaticheskaja ustanovka na avtomobile [jelektronnyj resurs]. http://autoholding.net/ 270_klimaticheskaja_ustanovka_na_avtomobile.html.

5. Svetlov D.O., Isaev V.V., Svetlov Ju.V. Jeffektivnaja teploprovodnost' materialov kapilljarno-poristoj i voloknistoj struktury na osnove makrokvantovogo termodinamicheskogo metoda // Sb.: Tehnologii HHI veka v legkoj promyshlennosti. – M.: MGUTU im. K.G. Razumovskogo, 2012.

6. Broiko A.P., Kharlamova O.N., Baranov A.Ju. Analysis of knitted structures and study of heat transfer processes in knitted structures //Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennostisti. – 2000, № 4. S. 82…84.

7. Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi. – M.: Jenergija, 1977.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования текстильных изделий. Поступила 28.02.17.